

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 536.425:539.25:539.531

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.005

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ПОКРЫТИЯ ВЭС Al-Fe-Co-Cr-Ni, СФОРМИРОВАННОГО НА СПЛАВЕ 5083

Юрий Федорович Иванов^{1†}, Виктор Евгеньевич Громов², Сергей Валерьевич Коновалов³,
Михаил Олегович Ефимов⁴, Юлия Андреевна Шлярова⁵, Ирина Алексеевна Панченко⁶,
Михаил Дмитриевич Старостенков⁷

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

^{2, 3, 4, 5, 6} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

⁷ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

¹ yufi55@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

² gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

³ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

⁴ moefimov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4890-3730>

⁵ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

⁶ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

⁷ genphys@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>

Аннотация. Используя технологию холодного переноса металла (проволочно-дуговое аддитивное производство (WAAM), совмещенное со сварочной наплавкой (СМТ)) на подложке из сплава 5083 сформировано покрытие высокоэнтропийным сплавом (ВЭС) Al-Fe-Co-Cr-Ni неэквивалентного состава. Методами современного физического материаловедения выполнен анализ структуры, фазового и элементного состава, дефектной субструктуры системы «покрытие-подложка». Показано, что элементный и фазовый состав, дефектная субструктура покрытия зависят от расстояния до зоны контакта покрытия и подложки. В слое толщиной до 200 мкм, примыкающем к зоне контакта, выявлено присутствие включений второй фазы на границах зерен ВЭС, обогащенной атомами хрома и железа. Микродифракционным анализом установлено, что это включения Al_3Cr_5 . В зоне перемешивания покрытия и подложки выявлено формирование нанокристаллической фазы Al_2O_3 и $MgAlO$ размером 10-20 нм и субзеренной структуры (размер субзерен 140-170 нм). Структура 1-го типа характеризуется неоднородным распределением химических элементов ВЭС, выявлены области пластинчатой формы, обогащенные атомами Cr и сферической формы, обогащенные атомами Ni, Fe, Co. По границам субзерен структуры располагаются наноразмерные частицы $(NiCo)_3$, Al_4 и $Al_{13}Fe_4$. Высказано предположение о физических механизмах повышения твердости материала в зоне контакта «покрытие-подложка».

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, метод холодного переноса металла, сплав алюминия 5083, элементный и фазовый состав, дефектная субструктура.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-19-00452) – изготовление системы «покрытие/подложка», исследование дефектной субструктуры и элементного состава методами электронной микроскопии; за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/> – исследование фазового состава зоны контакта системы «покрытие/подложка».

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Ефимов М.О., Шлярова Ю.А., Панченко И.А., Старостенков М.Д. Структурно-фазовые состояния покрытия ВЭС Al-Fe-Co-Cr-Ni, сформированного на сплаве 5083 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 1. С. 41–51. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.005.

Original article

STRUCTURAL AND PHASE STATES OF THE Al-Fe-Co-Cr-Ni HEA COATING FORMED ON THE 5083 ALLOY

Yurii F. Ivanov^{1†}, Victor E. Gromov², Sergey V. Kononov³, Mikhail O. Efimov⁴, Yulia A. Shliarova⁵, Irina A. Panchenko⁶, Mikhail D. Starostenkov⁷¹ Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademicheskyy Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia^{2, 3, 4, 5, 6} Siberian State Industrial University, Kirova Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia⁷ I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia¹ yufi55@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>² gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>³ kononov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>⁴ moefimov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4890-3730>⁵ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>⁶ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>⁷ genphys@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>

Abstract. Using the technology of cold metal transfer (wire-arc additive manufacturing (WAAM) combined with welding surfacing (CMT)) on a 5083 alloy substrate, a coating with a high-entropy alloy (HEA) Al-Fe-Co-Ni of non-equiatom composition is formed. Using the methods of modern physical materials science, the analysis of the structure, phase and elemental composition, defective substructure of the "coating-substrate" system was carried out. It is shown that the elemental and phase composition, the defective substructure of the coating depend on the distance to the contact zone between the coating and the substrate. In a layer up to 200 μm thick adjoining the contact zone, the presence of inclusions of the second phase at the grain boundaries of HEA enriched with chromium and iron atoms was revealed. Microdiffraction analysis established that these are inclusions of Al₈Cr₅. In the mixing zone of the coating and substrate, the formation of a nanocrystalline Al₂O₃ and MgAlO phase 10-20 nm in size and a subgrain structure (subgrain size 140-170 nm) were revealed. Structure of the first type is characterized by the heterogeneous distribution of HEA chemical elements, the regions of lamellar form enriched by Cr atoms and spherical form enriched by Ni, Fe, Co atoms were revealed. Nanosized particles (NiCo)₃, Al₄ and Al₁₃Fe₄ are located along the boundaries of the subgrains of the structure. An assumption is made about the physical mechanisms of increasing the hardness of the material in the contact zone "coating-substrate".

Keywords: high-entropy alloy, cold metal transfer method, 5083 aluminum alloy, elemental and phase composition, defective substructure.

Acknowledgements: The work was carried out with the support of a grant from Russian Science Foundation (project 20-19-00452) – fabrication of the "coating/substrate" system, study of the defective substructure and elemental composition by electron microscopy; at the expense of the Russian Science Foundation grant 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/> – study of the phase composition of the contact zone of the "coating/substrate" system.

For citation: Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Kononov, S. V., Efimov, M. O., Shliarova Yu. A., Panchenko, I. A. & Starostenkov, M. D. (2023). Structural and phase states of the Al-Fe-Co-Cr-Ni HEA coating formed on the 5083 alloy. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(1), 41–51. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.005.

Введение

В начале этого века появились работы по созданию и комплексному исследованию так называемых высокоэнтропийных полиметаллических сплавов (ВЭС), включающих 5 и более основных элементов [1-5]. К настоящему времени в экономически развитых странах опубликовано свыше 10000 работ по базам Scopus и Web of Science [1, 6]. Такой стремительный рост публикаций обусловлен уникальными свойствами ВЭС, такими как высокотемпературная прочность, суперпарамагнетизм, сопро-

тивление износу и коррозии, высокая твердость наряду с пластичностью и другие [7-12]. Этот комплекс высоких свойств обуславливает возможность применения ВЭС в ядерной энергетике, инструментальной и аэрокосмической промышленности, биомедицине и как материалы для хранения водорода.

В дальнейшем решение проблемы использования ВЭС с высоким комплексом свойств пойдет по пути создания покрытий. Уже достигнуты успехи использования нитридных покрытий на основе ВЭС в биомедицине. Защитные покрытия для биомедицинского примене-

ния должны обладать низким модулем эластичности, высокой химической стабильностью, износостойкостью и коррозионной стойкостью в физиологических средах, низким коэффициентом трения, биосовместимостью и отличной адгезией к поверхности, на которую наносятся покрытия [7].

Наличие нескольких составляющих элементов в составе ВЭС позволяет получать разнообразные покрытия с требуемыми физико-химическими свойствами, например, для применения в особых условиях. Вне зависимости от способов получения покрытий ВЭС основу их исследований должен составлять анализ структурно-фазового состояния и дефектной субструктуры на микро- и наномасштабном уровнях.

Целью настоящей работы является анализ элементного и фазового состава, дефектной субструктуры слоя ВЭС Al-Fe-Cr-Co-Ni, сформированного на сплаве 5083 методом холодного переноса металла.

Материал и методики исследования

В качестве материала исследования использованы образцы системы «покрытие/подложка». Покрытием являлся высокоэнтропийный сплав элементного состава Al-Fe-Cr-Co-Ni, который был сформирован на подложке методом холодного переноса металла [1]. Выбор ВЭС Al-Fe-Cr-Co-Ni, обусловлен его хорошей изученностью [13-19]. Подложкой являлся сплав 5083 на основе алюминия. Эффективность применения метода холодного пере-

носа металла (СМТ-процесс) при наплавке связана с тем, что за счет низкой температуры сварочной ванны перемешивание основного и электродного металла значительно меньше, чем при наплавке с применением классического сварочного MIG/MAG оборудования. Считается что изменения металлургической структуры, химического состава, а, следовательно, и эксплуатационных свойств наплавленного слоя при использовании метода холодного переноса металла минимальны. Это позволяет осуществлять наплавку меньшего количества слоев и в некоторых случаях отказаться от использования буферных или промежуточных слоев. Таким образом, существенно сокращается длительность операции наплавки и расход наплавочной проволоки.

Исследование элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры зоны контакта покрытия и подложки осуществляли методами просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100) электронной микроскопии [20-22]. Фольги для просвечивающего электронного микроскопа изготавливали ионным утонением (установка Ion Slicer EM-091001S, утонение осуществляется ионами аргона) пластинок, вырезанных из массивных образцов на установке Isomet Low Speed Saw перпендикулярно поверхности наплавленного слоя ВЭС из области границы раздела подложки и наплавки, что позволяло проследить изменение структуры и фазового состава материала по мере удаления от зоны контакта покрытия с подложкой.

Таблица 1. Химический состав сплава 5083, вес. %

Table 1. The chemical composition of the alloy 5083, wt. %

Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zr	Другие элементы	Al
< 0,25	< 0,10	< 0,40	4,0-4,9	< 1,0	< 0,10	< 0,15	< 0,25	< 0,15	Остальное

Результаты исследования и их обсуждение

Высокоэнтропийный сплав, сформированный методом холодного переноса металла на подложке из сплава 5083, является поликристаллическим агрегатом, имеет простую кубическую кристаллическую решетку. Следую результатам рентгенофазового анализа данного сплава, приведенным в работе [1], параметр кристаллической решетки сплава 0,28914 нм.

Характерной особенностью слоя толщиной до 200 мкм, примыкающего к зоне контакта покрытия и подложки, является присутствие на границах зерен ВЭС включений второй фазы. В стыках зерен данные включения имеют преимущественно округлую форму (рис.1). Иссле-

дование элементного состава зерен ВЭС и включений, расположенных в стыке зерен, осуществленное методами микрорентгеноспектрального анализа (табл.2) показало, что усредненный по трем зернам элементный состав данного слоя ВЭС таков: 26,6Al-0,3Si-6,8Cr-18,8Fe-7,5Co-44,0Ni. Элементный состав исследуемого ВЭС, приведенный в [1], 35,6Al-8,3Cr-17,3Fe-5,0Co-33,8Ni. Сопоставляя приведенные результаты, можно констатировать, что основными химическими элементами ВЭС в обоих случаях являются алюминий и никель. Частицы второй фазы, расположенные в стыке зерен ВЭС, обогащены атомами хрома и железа (табл.2, спектры № 4, 5, 6).

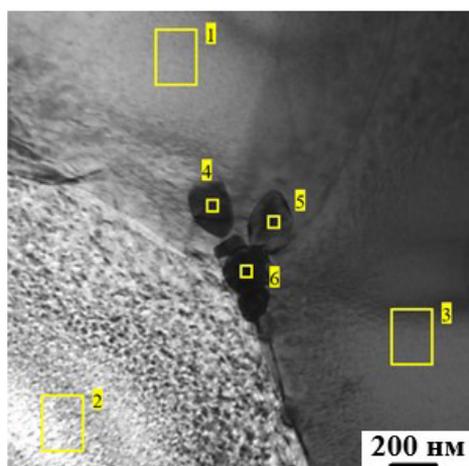


Рис.1. Электронно-микроскопическое изображение структуры ВЭС. Указаны участки микрорентгеноспектрального анализа элементного состава сплава

Fig.1. Electron microscopic image of the HEA structure. The areas of micro-X-ray spectral analysis of the elemental composition of the alloy are indicated

Таблица 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава участка сплава, изображенного на рис.1

Table 2. The results of X-ray microspectral analysis of the elemental composition of the alloy section shown in Fig.1

Спектр	Al, ат. %	Si, ат. %	Cr, ат. %	Fe, ат. %	Co, ат. %	Ni, ат. %
1	28,6	0,0	4,7	16,0	6,7	44,0
2	24,7	1,1	7,9	20,0	8,3	38,0
3	26,7	0,3	6,8	18,8	7,5	39,9
4	17,6	2,0	33,0	19,0	5,8	22,6
5	12,3	1,3	29,8	27,5	7,3	21,8
6	2,0	0,0	71,7	16,5	3,5	6,3

Частицы, расположенные вдоль границ зерен, имеют форму прослоек или округлую форму. Методами картирования показано, что данные включения преимущественно обогащены атомами хрома. При среднем содержании хи-

мических элементов на участке фольги, равном 30,0Al-1,3Si-10,4Cr-18,1Fe-6,8Co-33,4Ni, в частицах, расположенных на границе зерна, концентрация хромакратно выше (рис.2, табл.3).

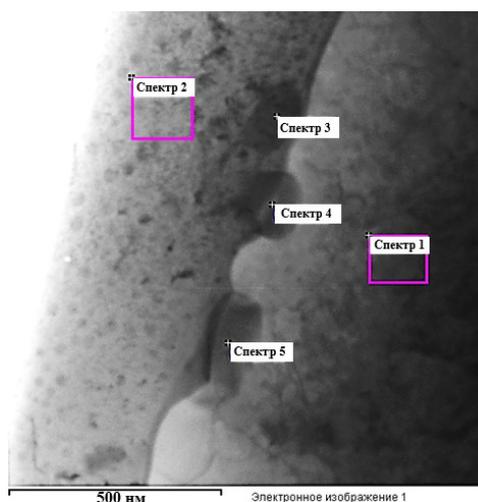


Рис.2. Электронно-микроскопическое изображение структуры ВЭС с частицами второй фазы на границах зерен. Указаны участки микрорентгеноспектрального анализа элементного состава сплава

Fig.2. Electron microscopic image of the HEA structure with particles of the second phase at the grain boundaries. The sections of X-ray microspectral analysis of the elemental composition of the alloy are indicated

Таблица 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава участка сплава, изображенного на рис.2**Table 3.** The results of X-ray microanalysis of the elemental composition of the alloy section shown in Fig.2

Спектр (ат. %)	Al	Si	Cr	Fe	Co	Ni
Спектр 1	26,36		8,40	19,39	7,52	38,34
Спектр 2	37,76		6,76	16,85	5,42	33,21
Спектр 3	12,40	2,45	53,67	11,33	3,78	16,38
Спектр 4	7,23		75,81	8,78	2,11	6,07
Спектр 5	20,36		52,28	11,04	3,78	12,53

Микродифракционный анализ участка фольги, электронно-микроскопическое изображение которого приведено на рис.2, с привлечением темнопольных изображений и методики индирования микроэлектроннограмм показал, что выявленные частицы сформированы твердым раствором на основе хрома, что свидетельствует о расслоении твердого раствора ВЭС и обособлении атомов хрома на границах зерен.

Микродифракционный анализ участка фольги, содержащего на границах зерен прослойки второй фазы, выполненный с привлечением темнопольных изображений и методики индирования микроэлектроннограмм, выявил присутствие на границах зерен ВЭС фазы Al_8Cr_5 (рис.3).

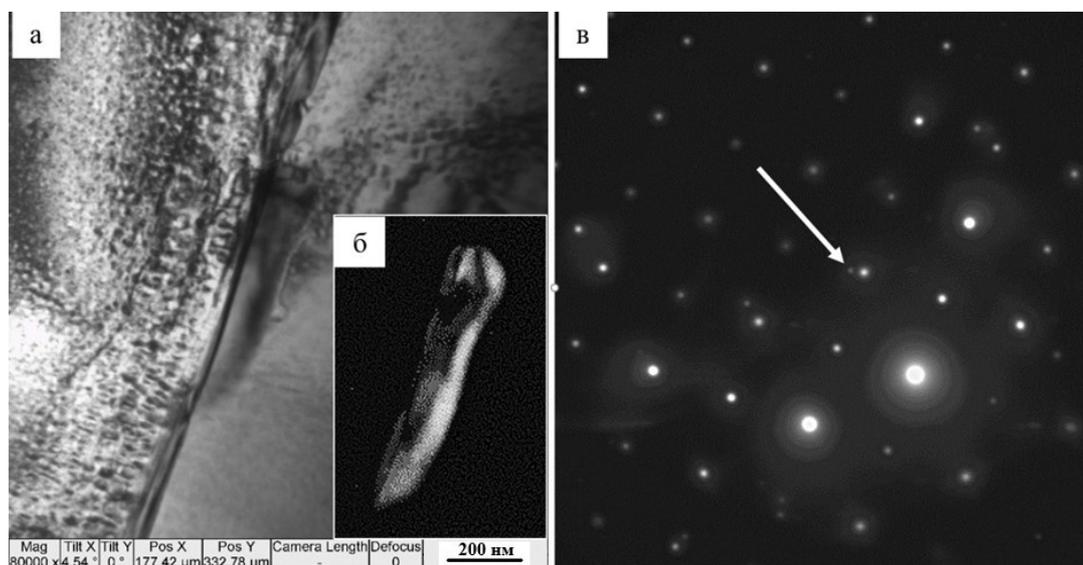


Рис.3. Электронно-микроскопическое изображение структуры ВЭС вблизи (≈ 50 мкм) зоны контакта с подложкой; а – светлое поле; б – темное поле, полученное в рефлексе $[152]Al_8Cr_5$; в – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле

Fig.3. Electron microscopic image of the HEA structure near (≈ 50 μm) the zone of contact with the substrate; a – bright field; b – dark field obtained in the reflection $[152]Al_8Cr_5$; c – microelectron diffraction pattern, the arrow indicates the reflection in which the dark field was obtained

Методами микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» выявлено расслоение твердого раствора ВЭС в объеме зерен. Установлено формирование в объеме зерен микрообластей, элементный состав которых отличается от элементного состава, усредненного по объему. Выявлено, что наиболее ликвидующим элементом сплава является хром, наименее ликвидующими элементами – алюминий и кобальт.

В зоне перемешивания (сплавления) покрытия и подложки наблюдаются два типа

структур. Во-первых, структура (далее по тексту структура типа 1), имеющая нанокристаллическое (10-20 нм) строение и, во-вторых, структура (далее по тексту структура типа 2), имеющая субзеренное (140-170 нм) строение.

Результаты элементного анализа, выполненные методом картирования, показывают, что структуры типа 1 характеризуется неоднородным распределением химических элементов сплава. Выявляются области преимущественно пластинчатой формы, обогащенные атомами

хрома, и области преимущественно сферической формы, обогащенные атомами никеля, железа и кобальта. Структура типа 2 является существенно более однородной по элементному составу сплава.

Методами микрорентгеноспектрального анализа был выявлен следующий элементный состав данных структур: структура типа №1 (ат. %) – 10,2Mg-64,7Al-5,2Cr-0,9Mn-9,4Fe-2,3Co-7,3 Ni; структура типа №2 (ат. %) – 61.1

Al-7,0 Cr-10,6 Fe-3,8 Co-17,5 Ni. Отчетливо видно, что зона контакта покрытия и подложки существенно обогащена алюминием и магнием (элементы подложки).

Методом «по точкам» осуществлен элементный анализ различных участков структуры типа 1 зоны контакта покрытия и подложки (рис.4). Результаты количественного анализа элементного состава указанных на рис.4 участков, приведены в табл.4.

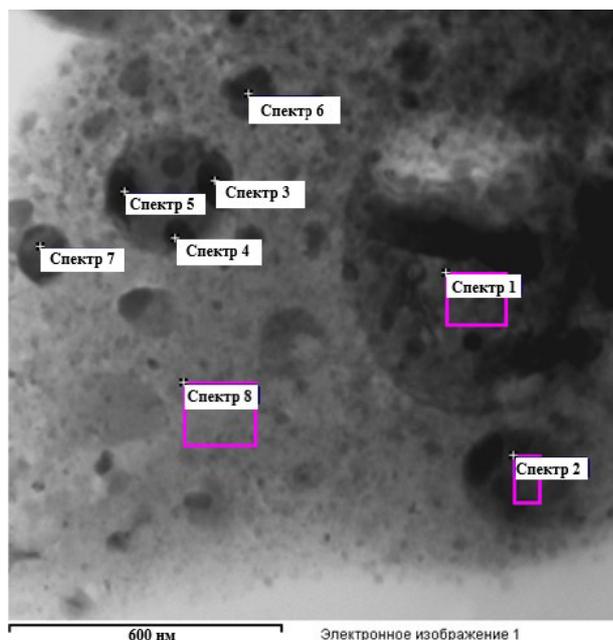


Рис.4. Электронно-микроскопическое изображение структуры типа 1 зоны контакта покрытия и подложки. Указаны участки микрорентгеноспектрального анализа элементного состава сплава

Fig.4. Electron microscopic image of the type 1 structure of the contact zone between the coating and the substrate. The sections of X-ray microanalysis of the elemental composition of the alloy are indicated

Таблица 4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава участка сплава, изображенного на рис.4

Table 4. The results of X-ray microspectral analysis of the elemental composition of the alloy section shown in Fig.4

Спектр	Mg	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Суммарный спектр	10,12	64,65	5,23	0,89	9,38	2,30	7,43
Спектр 1		46,69	1,96	1,86	23,53	7,11	18,84
Спектр 2	2,39	55,66	2,67	1,16	18,06	4,17	15,90
Спектр 3	3,12	22,79	35,06	2,16	25,04	3,48	8,34
Спектр 4		31,35	26,60	2,63	20,82	4,44	14,16
Спектр 5		11,00	43,39	4,20	30,54	3,66	7,20
Спектр 6	2,41	56,00			14,91	5,45	21,23
Спектр 7		49,18	1,92		18,41	6,51	23,99
Спектр 8	22,21	77,79					
Макс.	22,21	77,79	43,39	4,20	30,54	7,11	23,99
Мин.	2,39	11,00	1,92	0,89	9,38	2,30	7,20

Методом «по точкам» осуществлен элементный анализ различных участков структуры типа 2 зоны контакта покрытия и подложки (рис.5).

Результаты количественного анализа элементного состава указанных на рис.5 участков, приведены в табл.5.

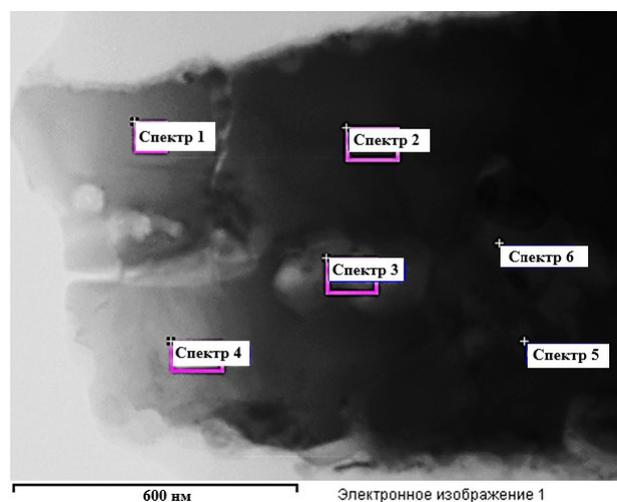


Рис.5. Электронно-микроскопическое изображение структуры типа 2 зоны контакта покрытия и подложки. Указаны участки микрорентгеноспектрального анализа элементного состава сплава

Fig.5. Electron microscopic image of the type 2 structure of the contact zone between the coating and the substrate. The areas of micro-X-ray spectral analysis of the elemental composition of the alloy are indicated

Таблица 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава участка сплава, изображенного на рис.5

Table 5. The results of X-ray microspectral analysis of the elemental composition of the alloy section shown in Fig.5

Спектр	Al	Cr	Fe	Co	Ni
Суммарный спектр	61,14	7,01	10,55	3,75	17,55
Спектр 1	56,26	5,89	10,68	4,23	22,94
Спектр 2	52,57	7,00	10,73	3,65	26,05
Спектр 3	70,64	4,28	7,48	2,91	14,69
Спектр 4	58,27	8,94	11,61		21,19
Спектр 5	69,89	8,44	11,95	2,38	7,34
Спектр 6	69,70	8,51	12,48	2,54	6,78
Макс.	70,64	8,94	12,48	4,23	26,05
Мин.	52,57	4,28	7,48	2,38	6,78

Сопоставляя результаты микрорентгеноспектрального анализа, приведенные в табл.4 и табл.5, можно отметить следующие особенности элементного состава участков типа 1 и типа 2 зоны контакта покрытия и подложки. Во-первых, отсутствие магния и марганца среди элементов, формирующих участок типа 2; во-вторых, существенно более однородное распределение химических элементов, формирующих участок типа 2; в-третьих, существенно более высокая концентрация никеля в объеме участка типа 2.

Фазовый состав рассмотренных выше участков зоны контакта покрытия и подложки

(рис.4-рис.5) изучали путем индицирования микроэлектроннограмм и использования методики темнопольного анализа. В результате выполненных исследований на микроэлектроннограмме были выявлены рефлексы оксидов состава Al_2O_3 и $MgAlO$, алюминия и рефлексы, принадлежащие ВЭС.

На рис.6 приведен результат анализа фазового состава структуры типа 2 зоны контакта покрытия и подложки, выполненные методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. В результате выполненного анализа микроэлектроннограммы, приведенной на рис.6,в, было показано, что данный участок

фольги сформирован высокоэнтропийным сплавом, имеющим субзернистую структуру (рис.6г,е). На границах субзерен располагаются

наноразмерные частицы $(\text{NiCo})_3\text{Al}_4$ (рис.6г) и $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ (рис.6д).

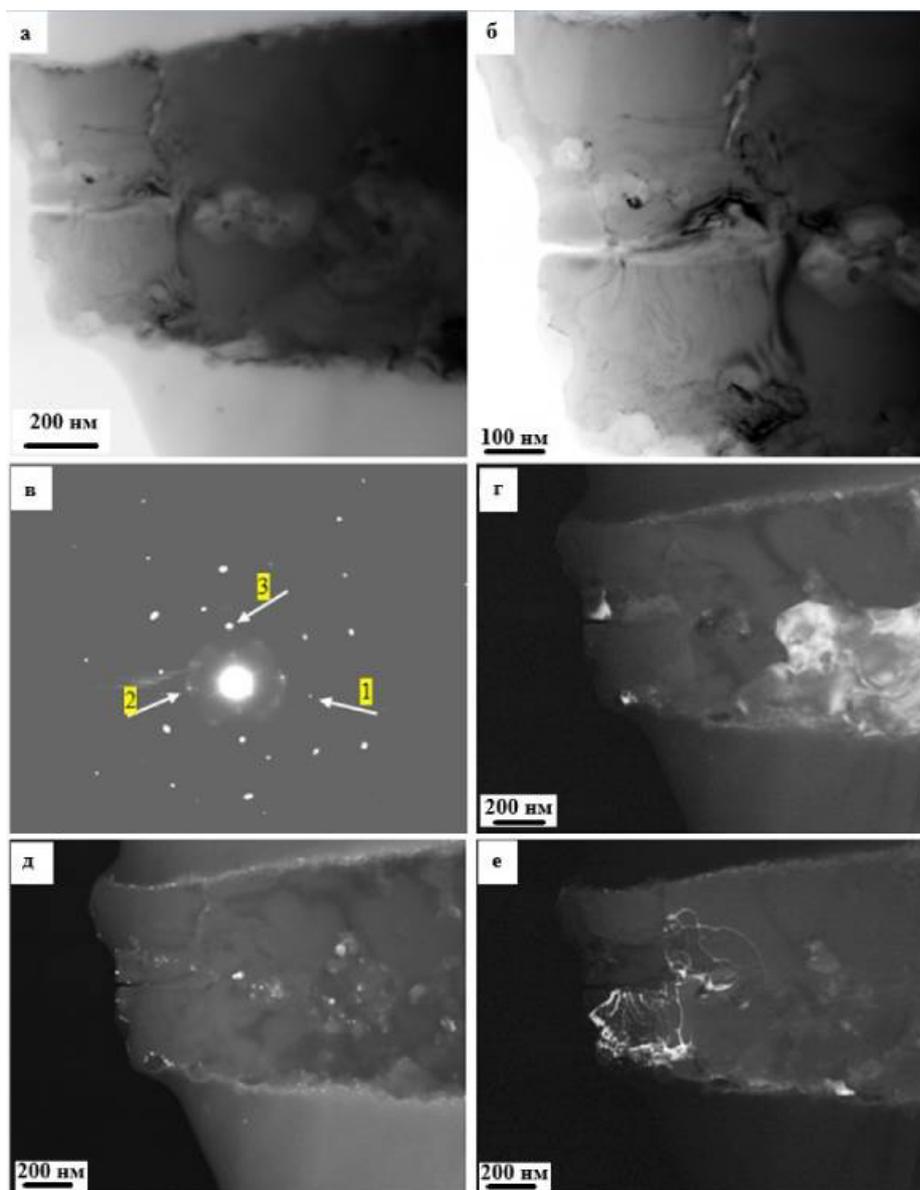


Рис.6. Электронно-микроскопическое изображение структуры типа 2 зоны контакта покрытия и подложки; а, б – светлые поля; в – микроэлектроннограмма, г-е – темные поля, полученные в рефлексах $[210]\text{ВЭС} + [840]$ $(\text{NiCo})_3\text{Al}_4$ (г), $[620]\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ (д), $[111]\text{ВЭС}$ (е); стрелками на (б) указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (г), 2 – для (д), 3 – для (е)

Fig.6. Electron microscopic image of the type 2 structure of the zone of contact between the coating and the substrate; a, b – light fields; (c) microelectron diffraction pattern, (d-f) dark fields obtained in $[210]\text{HEA} + [840]$ $(\text{NiCo})_3\text{Al}_4$ (d), $[620]\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ (e), $[111]\text{HEA}$ (f) reflections; arrows in (b) indicate reflections in which dark fields were obtained: 1 for (d), 2 for (e), 3 for (f)

Закключение

Методом холодного переноса металла на сплаве 5083 сформировано покрытие элементного состава Al-Fe-Cr-Co-Ni . Показано, что элементный и фазовый состав, дефектная субструктура покрытия зависят от расстояния до

зоны контакта покрытия и подложки. В зоне контакта (зона перемешивания (сплавления) покрытия и подложки) выявлено формирование двух типов структур. Во-первых, структуры, сформированной наноразмерными (10-20 нм) частицами окисной фазы (Al_2O_3 и MgAlO), субзернами алюминия и ВЭС. Во-вторых, структу-

ры, сформированной субзернами (140-170 нм) ВЭС, и наноразмерными частицами $(\text{NiCo})_3\text{Al}_4$ и $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, расположенными на границах субзерен.

Список литературы

- Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys. Springer. Advanced structured materials, 2021. V. 107. 110 p.
- Yeh J.W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys // JOM. The Journal of the minerals, metals and materials society. 2013. V. 65, N 12. P. 1759–1771.
- Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // Annales de Chimie: Science des Matériaux. 2006. V. 31, N 6. P. 633–648.
- Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // Изв. вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64, № 4. С. 249–258.
- Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsau C.H., Chang S.Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes // Advanced Engineering Materials. 2004. V. 6, N 5. P. 299–303.
- Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 8. С. 807–841.
- Погребняк А.Д., Багдасарян А.А., Якущенко И.В., Береснев В.М. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе // Успехи химии. 2014. Т. 83, № 11. С. 1027–1061.
- Zhang Y. High-Entropy Materials. Singapore: Springer Singapore, 2019. 152 p.
- Murtu B.S., Yeh J.W., Ranganathan S. High-Entropy Alloys. 1st Edition. Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2014. 218 p.
- Egami T., Gou W., Rack P.D., Nagase T. Irradiation Resistance of Multicomponent Alloys // Metall. Mater. Trans. A. 2014. V. 45, N 1. P. 180–183.
- Kao Y.-F., Chen S.-K., Sheu J., Lin J.-T., Lin W.-E., Yeh J., Lin S.-J., Liou T.-H., Wang C.-W. Hydrogen storage properties of multi-principal-component $\text{CoFeMnTi}_x\text{V}_y\text{Zr}_z$ alloys // Int. J. Hydrogen Energy. 2010. V. 35, N 17. P. 9046–9059.
- Li Z., Zhao S., Ritchie R.O., Meyers M.A. Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys // Progress in Materials Science. 2019. V. 102. P. 296–345.
- Jiao Z.M., Ma S.-G., Yuan G.-Z., Wang Z.-H., Yang H.-J., Qiao J.-W. Plastic Deformation of $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ and AlCoCrFeNi High-Entropy Alloys Under Nanoindentation // J. Mater. Eng. Perform. 2015. V. 24, N 8. P. 3077–3083.
- Tian Q., Zhang G., Yin K., Wang W., Cheng W., Wang Y. The strengthening effects of relatively lightweight AlCoCrFeNi high entropy alloy // Mater. Charact. 2019. V. 151. P. 302–309.
- Alagarsamy K., Fortier A., Komarasamy M., Kumar N., Mohammad A., Banerjee S., Han H.-C., Mishra R.S. Mechanical Properties of High Entropy Alloy $\text{Al}_{0.1}\text{CoCrFeNi}$ for Peripheral Vascular Stent Application // Cardiovasc. Eng. Technol. 2016. V. 7, N 4. P. 448–454.
- Shun T.T., Hung W.J. Effects of Cr Content on Microstructure and Mechanical Properties of AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy // Adv. Mater. Sci. Eng. 2018. V. 2018.
- Zhang L.S., Ma G.-L., Fu L.-C., Tian J.-Y. Recent progress in high-entropy alloys // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 631–632. P. 227–232.
- Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys // Progress in Materials Science. 2014. V. 61. P. 1–93.
- Gali A., George E.P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys // Intermetallics. 2013. V. 39. P. 74–78.
- Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.
- Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer, 2014. 717 p.
- Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.

Информация об авторах

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Сильноточной электроники СО РАН.

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им.

проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета.

М. О. Ефимов – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. А. Шлярова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

И. А. Панченко – кандидат технических наук, заведующая лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

М. Д. Старостенков – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

References

- Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F. & Osintsev, K. A. (2021). Structure and properties of high-entropy alloys. Springer. Advanced structured materials. V. 107. P. 110.
- Yeh, J. W. (2013). Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM. The Journal of the minerals, metals and materials society*, 65(12), 1759–1771.
- Yeh, J. W. (2006). Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie: Science des Matériaux*, 31(6), 633–648.
- Osintsev, K. A., Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F. & Panchenko, I. A. (2021). High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 64(4), 249–258. (In Russ.).
- Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Tsau, C. H. & Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299–303.
- Rogachev, A. S. (2020). Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *The Physics of Metals and Metallography*, 121(8), 733–764.
- Pogrebnyak, A. D., Bagdasaryan, A. A., Yakushchenko I. V. & Beresnev, V. M. (2014). The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them. *Russ. Chem. Rev.*, 83(11), 1027–1061. (In Russ.).
- Zhang, Y. (2019). High-Entropy Materials. Singapore: Springer Singapore. P. 152.
- Murtu, B. S., Yeh, J. W. & Ranganathan, S. (2014). High-Entropy Alloys. 1st Editio. Butterworth-Heinemann: Elsevier. P. 218.
- Egami, T., Gou, W., Rack, P. D. & Nagase, T. (2014). Irradiation Resistance of Multi-component Alloys. *Metall. Mater. Trans. A.*, 45(1), 180–183.
- Kao, Y.-F., Chen, S.-K., Sheu, J., Lin, J.-T., Lin W.-E., Yeh, J., Lin, S.-J., Liou, T.-H. & Wang, C.-W. (2010). Hydrogen storage properties of multi-principal-component CoFeMnTi_xV_yZr_z alloys. *Int. J. Hydrogen Energy*, 35(17), 9046–9059.
- Li, Z., Zhao, S., Ritchie, R. O. & Meyers, M. A. (2019). Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys. *Progress in Materials Science*, 102, 296–345.
- Jiao, Z. M., Ma, S.-G., Yuan, G.-Z., Wang, Z.-H., Yang, H.-J. & Qiao, J.-W. (2015). Plastic Deformation of Al_{0.3}CoCrFeNi and AlCoCrFeNi High-Entropy Alloys Under Nanoindentation. *J. Mater. Eng. Perform.*, 24(8), 3077–3083.
- Tian, Q., Zhang, G., Yin, K., Wang, W., Cheng, W. & Wang, Y. (2019). The strengthening effects of relatively lightweight AlCoCrFeNi high entropy alloy. *Mater. Charact.*, 151, 302–309.
- Alagarsamy, K., Fortier, A., Komarasamy, M., Kumar, N., Mohammad, A., Banerjee, S., Han, H.-C. & Mishra, R.S. (2016). Mechanical Properties of High Entropy Alloy Al_{0.1}CoCrFeNi for Peripheral Vascular Stent Application. *Cardiovasc. Eng. Technol.*, 7(4), 448–454.
- Shun, T. T. & Hung, W. J. (2018). Effects of Cr Content on Microstructure and Mechanical Properties of AlCoCr_xFeNi High-Entropy Alloy. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018.
- Zhang, L. S., Ma, G.-L., Fu, L.-C. & Tian, J.-Y. (2013). Recent progress in high-entropy alloys. *Advanced Materials Research*, 631–632, 227–232.
- Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K. & Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 61, 1–93.

19. Gali, A. & George, E. P. (2013). Tensile properties of high- and medium-entropy alloys. *Intermetallics*, 39, 74–78.

20. Egerton, F. R. (2016). *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing. P. 196.

21. Kumar, C. S. S. R. (2014). *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer. 717 p.

22. Carter, C. B. & Williams, D. B. (2016). *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing. 518 p.

Information about the authors

Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of High Current Electronics SB RAS.

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the

Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

S. V. Konovalov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation Activities of the Siberian State Industrial University.

M. O. Efimov – Post-graduate student of the Department of Natural Science named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

Yu. A. Shliarova – Post-graduate student of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University.

I. A. Panchenko – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University.

M. D. Starostenkov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена после рецензирования 24.01.2023; принята к публикации 07.02.2023.

The article was received by the editorial board on 10 Jan. 23; approved after reviewing 24 Jan. 23; accepted for publication 07 Feb. 23.